

compétition internationale intense, les biologistes n'ont en pratique que peu de temps à consacrer à une réflexion sur leur discipline. On peut aussi s'interroger sur la légitimité des sciences sociales à orienter les choix de recherche en biologie de synthèse.

Comment sortir de l'ornière ? Tout d'abord, il convient de rétablir une plus grande symétrie entre sciences sociales et biologie, de conférer aux premières l'autonomie dans la définition de leur objet de recherche afin d'établir la collaboration sur des bases équilibrées. Les échecs et difficultés témoignent d'une profonde incompréhension de ce que peut être un travail de recherche en sciences sociales. L'éviction de P. Rabinow montre que le chercheur en sciences sociales est considéré avant tout comme l'expert de « la société », capable d'ajuster les recherches afin qu'elles soient acceptables. Or le rôle des sciences sociales n'est pas de prescrire des antidotes contre d'éventuelles contestations ni d'être le porte-parole d'une société plurielle. Anthropologie, sociologie, philosophie, géographie, psychologie... les sciences sociales sont multiples et à chacune d'elles correspondent des théories, hypothèses de recherche et modes d'enquête propres. On peut dès lors imaginer plusieurs objets de recherche passionnants.

Prendre de la distance

Par exemple, dans notre laboratoire, nous travaillons sur le phénomène de l'émergence des champs technoscientifiques. Comment caractériser de tels processus ? Quelles sont les différences entre les émergences des champs scientifiques contemporains et de ceux apparus il y a plusieurs décennies ? Concernant la biologie de synthèse, nous observons deux points essentiels.

D'une part, les biologistes au cœur du processus ont un rôle à la fois de définition des questions de recherche et de structuration sociale de l'environnement de la biologie de synthèse. Par exemple, ils travaillent sur la propriété intellectuelle (en réfléchissant sur le libre accès des recherches – *open source biology*), sur la gestion des risques (avec le concept de sécurité à la conception – *safety by design*) ou sur l'enseignement de la discipline. D'autre part, si elle a des ambitions fondamentales, la biologie de synthèse se constitue autour de promesses d'applications pour résoudre de grands problèmes (énergétiques, médicaux, environnementaux...). La construction de la crédibilité

CHERCHEURS EMBARQUÉS



Le striga est une herbe qui parasite les cultures de riz, de sorgho, de cornille ou de maïs (*ci-dessus*), notamment en Afrique. Au Collège impérial de Londres, Travis Bayer et ses collègues se sont intéressés à la lutte contre cette herbe. Avec l'aide de deux chercheurs en sciences sociales « embarqués », ils se sont rendus au Zimbabwe pour échanger avec des agriculteurs et comprendre leurs besoins : ces petits producteurs n'ont pas les moyens d'acheter des traitements. Les biologistes ont alors conçu une levure qui produit une molécule provoquant une germination anticipée du striga, avant les semences, ce qui entraîne sa mort. Reste à viabiliser le projet et intéresser des investisseurs...

et de la légitimité des promesses conditionne la mobilisation des ressources et donc l'émergence de la biologie de synthèse.

Du fait de ces deux caractéristiques, il est impossible de distinguer les dimensions scientifiques et techniques de celles socio-économiques et politiques ; l'émergence de la biologie de synthèse est hybride, touchant à la fois la connaissance et la société. Cette caractéristique n'est pas inédite. Aussi, plutôt que de mettre l'accent sur une nouveauté radicale, il est primordial d'étudier l'émergence d'un point de vue historique pour identifier des récurrences, concernant par exemple les formes de réglementation de la nouveauté ou la propriété intellectuelle.

Ces observations peuvent aussi inspirer d'autres axes de recherche, notamment sur les conditions et modalités de la gouvernance de la biologie de synthèse. Dire que la biologie de synthèse est hybride, c'est admettre qu'elle ne peut pas être gouvernée par les seuls scientifiques (sciences sociales incluses). Il s'agit donc d'identifier les acteurs, les forces, les rapports de pouvoir. Qui finance la biologie de synthèse ? Comment sont faits les choix d'orientation ? Quelles visions du monde, quels imaginaires les inspirent ?

En même temps, il est nécessaire de ne plus voir la biologie de synthèse comme une évidence. Sa définition elle-même n'est pas stabilisée et unifiée. Se posent alors de nombreuses questions. Pourquoi parle-t-on de biologie de synthèse ? Quelle est l'origine de la notion ? Quels en sont les principes de démarcation ? On ne pourra saisir la spécificité des problèmes de gouvernance suscités par la biologie de synthèse qu'en y répondant.

D'autres objets de recherche sont possibles : comment, par exemple, la biologie de synthèse bouscule-t-elle la notion de frontière entre vivant et inanimé, naturel et artificiel ? L'idée essentielle est que la constitution de tels objets de recherche est une condition nécessaire pour susciter l'intérêt des biologistes à l'égard des sciences sociales. C'est sur cette base que se noueront des collaborations fructueuses et cela passe par une prise de distance par rapport à la démarche de chercheurs embarqués.

Cette prise de recul n'apporte pas la garantie d'un développement sans contestation des technologies émergentes. Mais elle permettra de produire des connaissances essentielles sur les enjeux qui se tissent autour de la biologie de synthèse et sur les relations entre sciences et société. ■

La supersymétrie, une théorie en crise ?

Joseph Lykken et Maria Spiropulu

Les théories supersymétriques promettent une meilleure compréhension du monde des particules élémentaires. Mais aucun indice de supersymétrie n'est apparu dans les expériences récentes réalisées au CERN. Cette idée séduisante risque-t-elle d'être abandonnée ?

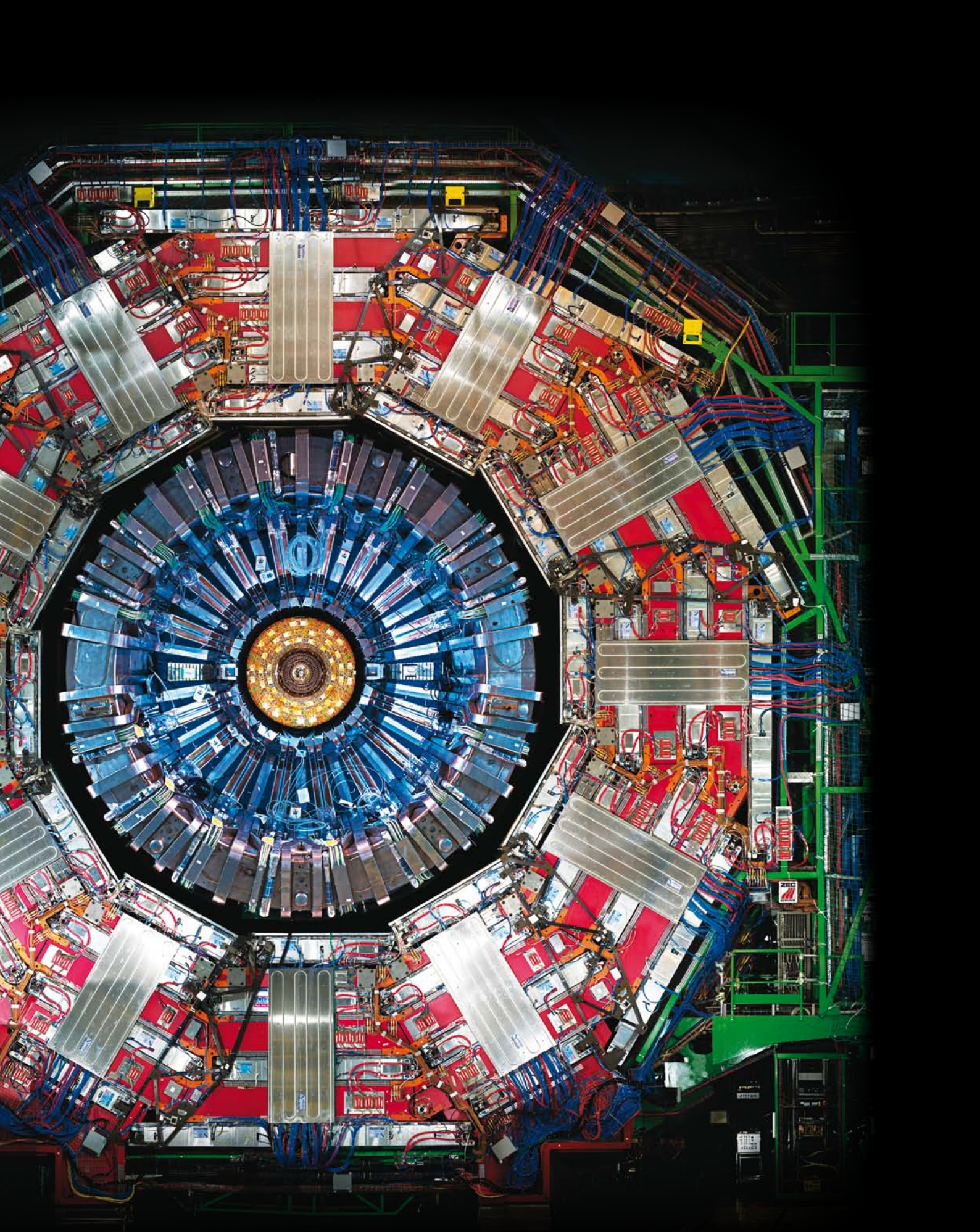
Ce matin de l'été 2012, à l'aube, nous en étions déjà à notre troisième expresso quand la liaison vidéo a été établie. Nous pouvions entamer une de nos réunions régulières de l'équipe *Razor*, nous à l'Institut de technologie de Californie et nos collègues au CERN, à Genève. Le groupe est constitué de physiciens chargés d'analyser certaines données du LHC (*Large Hadron Collider*, ou Grand collisionneur de hadrons). L'équipe s'intéresse plus particulièrement aux résultats de collisions de protons de haute énergie au cœur de l'expérience CMS (Solenioïde compact à muons, voir la figure 1), à la recherche d'événements dits exotiques qui apporteraient les premières preuves de la supersymétrie. Cette théorie de la matière développée il y a près de 45 ans est censée résoudre certains problèmes fondamentaux du modèle standard de la physique des particules et expliquer la nature de la mystérieuse matière noire de l'Univers. Or malgré des décennies de recherche, aucune preuve expérimentale de la supersymétrie n'est apparue à ce jour.

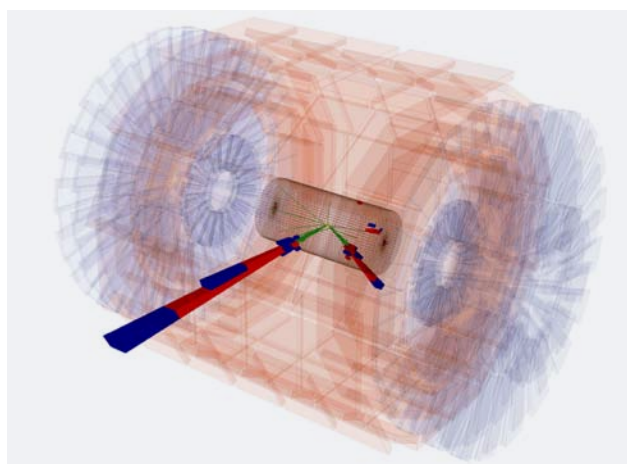
Au CERN, Maurizio Pierini, le chef de l'équipe *Razor*, montrait un graphique de nouvelles données ; à neuf fuseaux horaires de distance, nous pouvions voir les sourcils froncés de tous les membres présents dans la salle : il y avait une anomalie. « Quelqu'un devrait examiner cet événement », déclara M. Pierini. En quelques minutes, nous avions tous deux récupéré sur un ordinateur portable tout l'enregistrement de cette collision.

1. LE DÉTECTEUR CMS, au grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN, entamera une nouvelle campagne de recherche de preuves de l'existence de la supersymétrie à partir de 2015.

L'ESSENTIEL

- Les théories de la supersymétrie postulent qu'à chaque espèce de particule correspond un « superpartenaire » de masse élevée.
- La supersymétrie résout certains problèmes inhérents au modèle standard de la physique des particules.
- La nature de la matière noire reste inconnue, mais la supersymétrie suggère des candidats.
- Les expériences au LHC, le grand collisionneur de protons du CERN, n'ont pas révélé jusqu'ici d'indices de supersymétrie. Les théoriciens envisagent des alternatives.





CERN/CMS

2. L'AUGMENTATION DE L'ÉNERGIE DES COLLISIONS permettra à l'expérience CMS (à gauche) de rechercher des particules supersymétriques plus massives. Un signal positif de supersymétrie pourrait ressembler à cette fausse alerte enregistrée en 2012 (à droite) : deux jets de particules (rouge et bleu) partent vers le bas, ce qui suggère que des superpartenaires, invisibles pour le détecteur, s'échappent vers le haut.

La supersymétrie est une solution efficace et mathématiquement élégante pour expliquer des tracas qui tourmentent les physiciens depuis longtemps. Cette théorie apporte des réponses à toute une série de questions importantes. Pourquoi les particules ont-elles ces masses-là ? Pourquoi les forces ont-elles ces intensités-là ? En d'autres termes : pourquoi l'Univers est-il tel qu'il est ? De plus, la supersymétrie prévoit l'existence de particules nouvelles, des « superpartenaires » de celles qu'on connaît, et jusqu'ici non observées. Ces particules pourraient constituer la matière noire, qui représente 85 pour cent de la matière de l'Univers et qui se manifeste uniquement par des effets gravitationnels.

Pour de nombreux physiciens des particules, la théorie de la supersymétrie est nécessairement vraie, tant elle est convaincante. Ils espèrent que le LHC découvrira ces superpartenaires, ce qui prouverait sa validité.

Quand nous avons téléchargé les données de la collision mentionnée plus haut, nous avons immédiatement pensé y voir un signal de la supersymétrie. Deux jets de particules partaient du centre du détecteur, vers le bas. Des particules invisibles pour les détecteurs étaient-elles parties vers le haut, peut-être des superpartenaires ? Mais l'analyse détaillée des différents signaux nous a rapidement fait supposer un mauvais fonctionnement du détecteur (voir la figure 2). Et en effet, c'était bien là l'explication.

Les résultats de la première campagne de fonctionnement du LHC ont exclu presque toutes les versions les mieux étudiées de la supersymétrie, celles où les superpartenaires

sont plutôt légers. Pour l'instant, ces résultats négatifs n'ont pas provoqué une crise à grande échelle de la physique des particules, mais plutôt une inquiétude généralisée. Le LHC entamera sa prochaine campagne au début de 2015, avec des collisions à des énergies plus élevées (14 téraélectronvolts), ce qui permettra aux chercheurs des expériences ATLAS et CMS de débusquer (s'ils existent) des superpartenaires plus lourds que dans les modèles précédents. Si, à la fin de cette campagne, la supersymétrie se dérobe toujours, la physique fondamentale se trouvera à la croisée des chemins : abandonner les travaux de toute une génération faute de preuves, ou persévérer dans la même voie en espérant qu'un collisionneur plus puissant révélera un jour des particules liées à la supersymétrie.

La supersymétrie, hypothèse nécessaire

L'histoire des sciences a connu de longues quêtes couronnées de succès – ne serait-ce que la découverte récente, au LHC, du boson de Higgs, particule qui s'est fait attendre près de 40 ans. Mais pour le moment, la plupart des théoriciens des particules s'impatientent, tandis qu'au LHC on se prépare à tester les fondations de l'édifice théorique qu'ils ont mis un demi-siècle à bâtir.

Nous disposons en physique subatomique d'une théorie prédictive très efficace, le modèle standard, qui décrit les particules et leurs interactions. Dans ce modèle, qui est une théorie quantique des champs (fondée sur la physique quantique et la théorie de

la relativité restreinte d'Einstein), la matière est constituée d'un type de particules, les fermions (du nom du physicien italien Enrico Fermi). Ces particules de matière interagissent *via* l'échange d'une autre variété de particules, les bosons (du nom du physicien indien Satyendranath Bose).

Le modèle standard décrit fort bien ce qui se passe au niveau subatomique. Il a été testé depuis les années 1970 sans présenter de faille. Mais les ennuis commencent quand on s'interroge sur l'origine des caractéristiques du modèle standard. Par exemple, ce modèle stipule qu'il existe trois types différents de leptons (des fermions) : l'électron, le muon et le tau. Pourquoi trois ? Pourquoi pas deux, ou quatre, ou quinze ? Le modèle standard ne l'explique pas. De même, on peut se demander pourquoi l'électron a une masse d'une telle valeur et pas une autre. Par exemple, pourquoi est-il plus léger que le boson de Higgs ? Sur ce sujet encore, le modèle standard ne dit rien.

Les physiciens théoriciens réfléchissent beaucoup à ces questions. Ils construisent des modèles plus fondamentaux dont le modèle standard serait la manifestation à basse énergie. Ces théories sont censées expliquer comment le modèle standard fonctionne et ce qui détermine les valeurs de ses paramètres. La théorie des cordes, par exemple, est l'une des voies explorées parmi bien d'autres.

Cependant, tous ces modèles plus fondamentaux impliquent l'existence de nouvelles particules hypothétiques. Celles-ci pourraient avoir une masse extrêmement élevée, d'où la difficulté à les créer dans les expériences. Cela expliquerait pourquoi on

ne les a pas encore repérées au LHC. Mais ces particules qui semblent incontournables soulèvent des difficultés par leur influence sur les particules ordinaires. Comment ? La réponse se trouve du côté de l'étrangeté quantique.

En théorie quantique des champs, les particules interagissent *via* l'échange de particules dites virtuelles qui n'ont qu'une existence très brève. Par exemple, la répulsion électrique entre deux électrons est décrite, en première approximation, par l'échange d'un photon virtuel entre les deux électrons. Dans les années 1940-1950, le physicien américain Richard Feynman a conçu des règles élégantes pour transcrire les calculs correspondant à ces processus sous la forme de diagrammes visuellement parlants.

Mais en physique quantique, tout ce qui n'est pas strictement interdit se produit effectivement, au moins de temps à autre. Ainsi, les électrons peuvent interagir entre eux, mais aussi avec toutes les particules très massives dont l'existence est prédite par les extensions du modèle standard. Or ces interactions conduisent à des difficultés – à moins qu'une propriété telle que la supersymétrie ne vienne les résoudre.

Voyons comment un tel problème se manifeste dans le cas du boson de Higgs. Cette particule confère aux autres particules élémentaires leur masse par son interaction avec elles. S'il existe des particules superlourdes, alors le boson de Higgs interagirait aussi avec elles par l'intermédiaire de particules virtuelles. Or le boson de Higgs acquiert une partie de sa propre masse par des interactions virtuelles. En présence de particules superlourdes, il deviendrait lui-même superlourd. Par conséquent, toutes les particules que nous connaissons devraient être superlourdes et les conséquences seraient catastrophiques pour l'Univers. Nous deviendrions tous des trous noirs. Or ce n'est pas ce que nous observons. Il existe donc un mécanisme qui empêche cette catastrophe. Et rien n'explique aussi bien que la supersymétrie pourquoi cela n'arrive pas.

Les principes fondamentaux de la supersymétrie ont été développés dans les années 1970 par des physiciens qui s'intéressaient aux relations entre les symétries et la physique des particules. La supersymétrie n'est pas à proprement parler une théorie, mais plutôt un cadre théorique. De nombreux modèles sont qualifiés de

supersymétriques, car ils sont fondés sur le même type de symétries.

Plusieurs symétries classiques sont intégrées dans les lois physiques portant sur les particules et leurs interactions. En effet, ces lois ne doivent pas dépendre de l'endroit où vous êtes, de la direction considérée, de votre état de mouvement. La physique est la même dans toutes ces situations et les symétries le garantissent. À ces symétries spatio-temporelles (symétries par translation dans le temps et dans l'espace, symétrie par rotation) correspondent des lois de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique.

Les symétries font la loi

La physique quantique semble respecter toutes ces symétries. Les scientifiques ont même utilisé les symétries pour prévoir de nouveaux phénomènes. Par exemple, le physicien britannique Paul Dirac a montré en 1930 que quand on combine la mécanique quantique avec la relativité restreinte, les symétries de l'espace-temps impliquent qu'à chaque type de particule correspond une antiparticule (de même masse mais de charge opposée). Cette idée semblait folle à l'époque parce que personne n'avait jamais observé d'antiparticule. Mais les expériences ont prouvé que Dirac avait raison : le zoo des particules élémentaires est dédoublé.

La théorie de la supersymétrie repose sur un argument similaire à celui de Dirac. Elle postule qu'il existe une extension quantique de l'espace-temps nommée le superspace, par rapport auquel les particules ont une symétrie.

Le superspace ne présente pas de dimensions spatiales ordinaires telles que gauche-droite ou haut-bas, mais plutôt des dimensions « fermioniques ». Le mouvement dans une dimension fermionique est très limité. Dans une dimension spatiale ordinaire, vous pouvez vous déplacer aussi loin que vous voulez dans toutes les directions, sans restriction de la taille ou du nombre de pas que vous faites. En revanche, dans une dimension fermionique, vos pas sont quantifiés, et une fois que vous avez fait un pas vous avez atteint l'extrémité de cette dimension fermionique. Si vous voulez faire d'autres pas, vous devez soit passer à une autre dimension fermionique, soit reculer d'un pas.

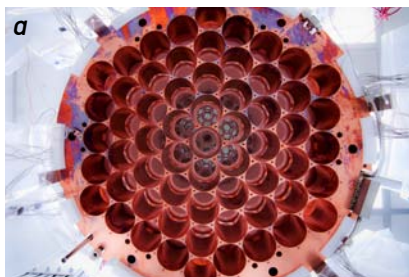
LES AUTEURS



Joseph LYKKEN est physicien théoricien au Laboratoire américain de l'accélérateur Fermi de Batavia, dans l'Illinois.



Maria SPIROPULU est physicienne des particules expérimentatrice à l'Institut de technologie de Californie. Après avoir travaillé au Tevatron du Laboratoire Fermi, elle participe désormais à l'expérience CMS, au LHC du CERN.



Carlos H. Faham



Armand Flasson

3. LA RECHERCHE DE MATIÈRE NOIRE sous forme de particules supersymétriques se fait par différentes approches, outre le LHC. Dans l'expérience LUX, dans le Dakota du Sud (a), les physiciens cherchent des collisions très rares de ces particules avec la matière ordinaire. Les télescopes HESS-2, en Namibie (b), étudient par exemple le rayonnement énergétique provenant du centre galactique. Il pourrait être produit par l'annihilation de paires de particules de matière noire.

Un boson qui fait un pas dans une dimension fermionique se transforme en fermion; inversement, un fermion se transforme en un boson après un pas. De plus, si la particule effectue un pas dans une dimension fermionique et qu'elle revient ensuite en arrière, elle se sera déplacée d'une petite quantité dans l'espace ou le temps ordinaires. Autrement dit, dans les théories supersymétriques, le mouvement dans les dimensions fermioniques est lié de façon complexe au mouvement dans l'espace-temps ordinaire.

Pourquoi tout cela est-il important? Parce que dans un monde supersymétrique, les symétries entre les dimensions fermioniques restreignent la façon dont les particules peuvent interagir. En particulier, les supersymétries dites naturelles éliminant dans une large mesure les effets des particules virtuelles. Les supersymé-

tries naturelles empêchent le boson de Higgs d'interagir avec les particules les plus lourdes et d'augmenter ainsi inconsiderablement sa masse. Les théories qui sont supersymétriques mais non « naturelles » obligent à trouver des mécanismes complémentaires pour réprimer les effets des particules virtuelles. Ainsi, la supersymétrie naturelle fournit aux physiciens des solutions aux difficultés du modèle standard.

Toutes les théories supersymétriques impliquent que chaque boson a une particule partenaire fermionique, un « superpartenaire », et inversement. Or aucune particule connue n'est le superpartenaire d'une autre. Si la supersymétrie existe, les superpartenaires de toutes les particules du modèle standard sont à découvrir.

Et c'est bien là le problème. Dans les versions les plus simples et les plus efficaces de la supersymétrie (la supersymétrie

naturelle), les superpartenaires ne devraient pas être beaucoup plus lourds que le boson de Higgs. Cela signifie que nous devrions être capables de les détecter au LHC. Et si l'on avait posé la question aux physiciens il y a dix ans, la plupart auraient prédit que l'on aurait désormais trouvé des preuves de l'existence des superpartenaires.

La traque au LHC commence

Mais ce n'est pas le cas. Maria Spiropulu, l'une d'entre nous, garde en mémoire cette nuit de 2009 où elle est allée prendre le poste de chef de quart au détecteur CMS peu avant minuit. Dans la salle de contrôle, une foule de physiciens suivaient chacun un sous-système de l'énorme détecteur complexe de 14 000 tonnes. À deux heures du matin, elle reçut un appel du centre de contrôle du

Une voie alternative : un monde aux dimensions cachées

Le terrain de jeu des physiciens est l'espace-temps où ils vivent et travaillent. Il existe plusieurs bonnes raisons de penser que cet espace-temps comporte quatre dimensions. Mais imaginer qu'il pourrait en cacher davantage apporte des solutions à certains problèmes du modèle standard.

L'intensité des forces électromagnétique et gravitationnelle, celles qui gouvernent l'essentiel de notre vie au quotidien, décroît comme l'inverse du carré de la distance aux sources de ces forces. Cela serait lié au fait que l'espace comporte trois dimensions. La raison est géométrique : d'une part, le champ associé à une source ponctuelle a une symétrie sphérique et, d'autre part, la surface d'une sphère est proportionnelle au carré de son rayon... dans un espace euclidien à trois dimensions. Et pour conserver le flux associé au champ, l'intensité doit décroître comme l'inverse du carré de la distance à la source.

Mais ce raisonnement s'applique à des échelles macroscopiques. Le monde microscopique, celui des particules élémentaires – quarks, leptons,

boson de Higgs et autres bosons de jauge –, est le règne de la physique quantique et de la relativité restreinte qui n'ont que faire de notre perception macroscopique de l'espace et du temps. L'intensité de la force électrostatique entre deux électrons est-elle toujours proportionnelle à l'inverse du carré de la distance qui les sépare? Pas exactement. Il y a des facteurs correctifs, mesurés aujourd'hui avec une grande précision, qui sont d'autant plus importants que les deux électrons sont proches. Doit-on y voir le signe que les électrons ne se propagent plus dans un espace-temps à quatre dimensions? Non, bien au contraire. Car ces corrections sont exactement celles prédites par le modèle standard et sont la signature du comportement quantique des particules

élémentaires. Pourquoi alors imaginer un monde avec des dimensions en plus? Parce qu'un espace-temps plus grand a bien d'autres avantages.

Ainsi, dès les années 1920, les physiciens Theodor Kaluza et Oskar Klein ont montré que l'existence de dimensions supplémentaires pourrait conduire à une description unifiée des interactions fondamentales. Ils ont montré que les équations à quatre dimensions de la gravité et de l'électromagnétisme pouvaient être déduites simultanément des seules équations de la gravité à cinq dimensions. Dans les années 1980, le développement de la théorie des cordes a permis de comprendre que réconcilier gravité et physique quantique demandait plus d'espace : seuls des espaces-temps à 10, 11 ou 26 dimensions possédaient les propriétés de symétries nécessaires pour rendre la théorie viable.

La nécessité de ces dimensions supplémentaires pour formuler une théorie quantique de la gravitation a encouragé

l'émergence d'idées révolutionnaires. À la fin des années 1990, on a compris que ces dimensions supplémentaires pouvaient offrir une alternative à la supersymétrie pour comprendre pourquoi la gravité est une force si faible comparée aux autres interactions fondamentales. Deux scénarios importants ont été proposés.

Selon la première idée, émise par Nima Arkani-Hamed, de l'Institut d'études avancées de Princeton, Savvas Dimopoulos, de l'Université Stanford, et Gia Dvali, des Universités de New-York et de Munich, la force de gravitation serait faible parce que diluée dans de grandes dimensions supplémentaires, mais hermétiques à la matière ordinaire et donc à nos sens. Le mariage de la gravité et de la physique quantique aurait lieu à des échelles d'énergies accessibles au LHC. Dans les débris des collisions de protons, les restes de l'évaporation de mini-trous noirs pourraient apparaître.

Une autre idée est celle de Lisa Randall, de l'Université Harvard,

CERN de l'autre côté de l'anneau du LHC, long de 27 kilomètres : ils allaient effectuer les collisions de protons aux plus hautes énergies jamais réalisées.

Elle a donné le signal pour qu'on active avec précaution chaque portion du détecteur. Un mur d'écrans a commencé à s'animer, les dispositifs électroniques ultrarapides affichant à toute vitesse les collisions qui se produisaient au rythme de 20 millions par seconde à 100 mètres sous terre. Après avoir traqué la supersymétrie pendant une décennie au collisionneur *Tevatron* du Fermilab, aux États-Unis, elle avait le cœur qui palpitait à l'idée de reconnaître certains motifs caractéristiques de la supersymétrie. Il est tentant d'analyser les collisions par inspection visuelle, mais il est impossible de faire des découvertes de cette façon. Difficile de se raisonner et de rester calme ! Mais elle savait que ce n'était que le début.

Et, quand on construit un collisionneur à sept milliards d'euros avec ses détecteurs géants, on ne le met pas en route en s'attendant à des découvertes la première nuit – ni même la première année. Et pourtant les attentes de M. Spiropulu et ses collègues étaient grandes dès le début.

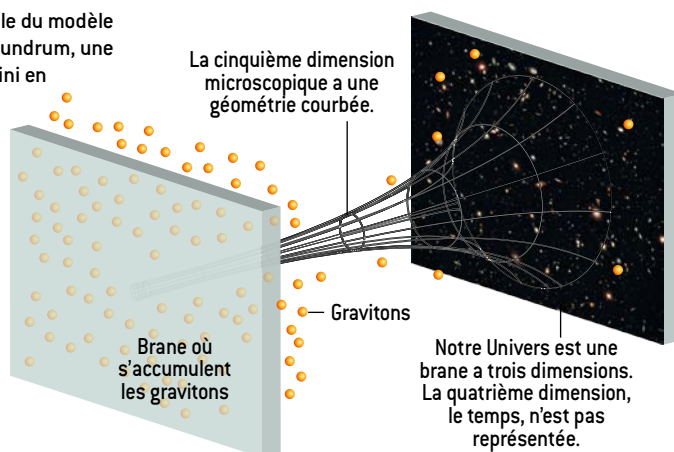
Sur CMS (et sur ATLAS), ils avaient élaboré un plan détaillé des analyses à effectuer sur les données du LHC pour découvrir la supersymétrie. Ils s'étaient préparés pour détecter des particules de matière noire dans des signaux de supersymétrie, non pas directement visibles mais sous forme d'« énergie manquante » : la matière noire n'interagit pas avec les détecteurs, mais emporte une partie de l'énergie totale de la collision, ce qui trahit leur présence (d'autres types d'expériences traquent la matière noire, voir la figure 3).

Nous étions allés jusqu'à rédiger une ébauche d'article annonçant la découverte.

Cet article n'a pas été écrit, car les physiciens du LHC n'ont toujours rien trouvé. Ils procèdent de façon systématique et rigoureuse, ce qui leur a permis d'éliminer de nombreux scénarios possibles. Les superpartenaires ne peuvent pas être trop légers, car ils auraient déjà été mis en évidence. Et on suppose qu'ils ne peuvent pas être trop lourds, parce qu'alors ils ne satisferaient pas les critères nécessaires pour supprimer les effets gênants des particules virtuelles. Si le LHC ne les découvre pas dans sa prochaine campagne, la crise dans ce domaine de la physique prendra de l'ampleur.

Malgré ces difficultés, les théoriciens ne sont pas prêts à abandonner la supersymétrie, même s'ils doivent se replier sur une version plus générale qui n'a pas toutes les

DANS LA VERSION originale du modèle de Lisa Randall et Raman Sundrum, une brane (un objet étendu défini en théorie des cordes) à trois dimensions contient notre Univers. Ce dernier est séparé d'une autre brane par une cinquième dimension fortement courbée. La gravité est faible dans notre brane car les gravitons, particules hypothétiques véhiculant cette force, se concentrent sur l'autre brane.



et Raman Sundrum, de l'Université du Maryland : la gravité est faible parce que les dimensions supplémentaires seraient fortement courbées sous l'effet d'une énergie du vide importante. Cette courbure éloignerait les gravitons – les hypothétiques particules véhiculant la gravité qui peuvent se déplacer dans les dimensions supplémentaires – de la matière ordinaire. Cela réduirait l'intensité de la gravité. Même si ce modèle prédit lui aussi de nouvelles particules accessibles aux détecteurs d'ATLAS et CMS, la gravitation

conserverait un comportement classique jusqu'à des énergies proches de l'échelle de Planck, soit 10^{19} gigaélectronvolts.

Le cadre de ces deux scénarios est suffisamment riche pour, par exemple, expliquer l'abondance de la densité de matière noire dans l'Univers ou rendre compte de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Toutefois la récente observation de la polarisation des photons du fond diffus cosmologique par l'expérience BICEP2, interprétée comme la

manifestation d'ondes gravitationnelles primordiales engendrées à l'époque de l'inflation, semble peu compatible avec une faible échelle de gravitation quantique telle que la prédit le premier scénario.

Le champ d'application des théories physiques intégrant des dimensions supplémentaires s'est encore élargi lorsqu'on a compris que ces dernières pouvaient être un artefact mathématique pour décrire des systèmes fortement couplés dans un simple espace à quatre dimensions. Ce nouveau

chapitre a débuté avec la conjecture audacieuse d'un théoricien des cordes, Juan Maldacena, à Princeton, qui a postulé en 1997 que, de la même façon qu'en mécanique quantique ondes et particules sont deux descriptions équivalentes d'une même réalité, une nouvelle force peut être décrite de façon équivalente par une nouvelle dimension d'espace. Cette dualité est très féconde pour décrire une interaction intense qui ne peut être appréhendée par les méthodes de calcul habituelles, et offre une description géométrique dans laquelle les calculs peuvent être conduits simplement. Cette approche a été appliquée avec succès pour étudier, par exemple, l'interaction forte dans le cadre de la chromodynamique quantique. Ces idées ont même trouvé des applications pour comprendre certaines propriétés de matériaux supraconducteurs et de superfluides.

– **Christophe Grojean**

Institut catalan de recherches et d'études avancées et Institut de physique des hautes énergies de Barcelone

qualités qu'on attendait de la supersymétrie naturelle. Rappelons que la supersymétrie est avant tout un cadre qui permet de développer des modèles du monde des particules, et non un modèle en lui-même, si bien que les données futures pourraient conforter l'idée de supersymétrie même si tous les modèles actuels sont exclus.

Nima Arkani-Hamed, physicien à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, expliquait dans un exposé ce qui pourrait être l'avenir de la supersymétrie: «Si on ne trouve pas de trace de la supersymétrie au LHC, alors les théoriciens bâtiront de nouveaux modèles supersymétriques qui placent les superpartenaires juste hors de portée des expériences.»

Cette fidélité indéfectible à la supersymétrie est partagée. Cependant, les physiciens des particules admettent que l'idée de la supersymétrie naturelle est déjà mal en point et qu'elle finira dans les oubliettes de l'histoire si l'on ne trouve pas bientôt des superpartenaires.

Et si la supersymétrie ne décrivait pas le monde, quelles sont les alternatives? Comme

nous l'avons expliqué, le modèle standard pose des questions sans réponses telles que la stabilité de la masse du boson de Higgs et pourquoi elle ne devient pas très grande. Il est donc indispensable de s'aventurer au-delà du modèle standard. Voici trois pistes possibles. Toutes entraînent la réflexion en physique fondamentale et en cosmologie dans des directions radicalement différentes.

SI LA SUPERSYMÉTRIE EST ABSENTE à la fin de cette campagne, la physique fondamentale se trouvera à la croisée des chemins : abandonner la supersymétrie ou persévérer.

Une première approche est d'invoquer le multivers : notre Univers ne serait qu'un parmi un très grand nombre. Pourquoi cette idée? Les intensités des forces fondamentales et les valeurs des masses des particules font intervenir des nombres dont l'origine est un mystère. Et la moindre variation sur ces nombres aurait conduit à un univers très différent. Par exemple, avec d'autres valeurs, même légèrement différentes, les atomes seraient instables et

la vie ne pourrait pas apparaître. Dans le jargon de la physique théorique, on dit que l'Univers est «finement ajusté». On peut tenter d'expliquer ces valeurs, comme avec la supersymétrie, ou considérer qu'elles sont le fruit du hasard. Cette idée n'est pas très satisfaisante, mais elle devient plus séduisante si l'on postule un multivers.

Dans ce scénario, le Big Bang a produit non seulement l'Univers que nous voyons, mais aussi un grand nombre d'autres univers – que nous ne percevons pas. Dans ce cas, la réponse aux questions telles que «Pourquoi l'électron a-t-il cette masse-là?» serait du

type: «C'est juste le hasard, d'autres parties du multivers ont des électrons de masse différente.» Ces supposés ajustements fins qui nous intriguent tant ne seraient que des accidents de l'histoire cosmique. Seuls les univers dont les paramètres ont les bonnes valeurs, compatibles avec le développement de la vie, contiendront à terme des physiciens qui vont s'étonner de ne pas trouver la supersymétrie naturelle au LHC.

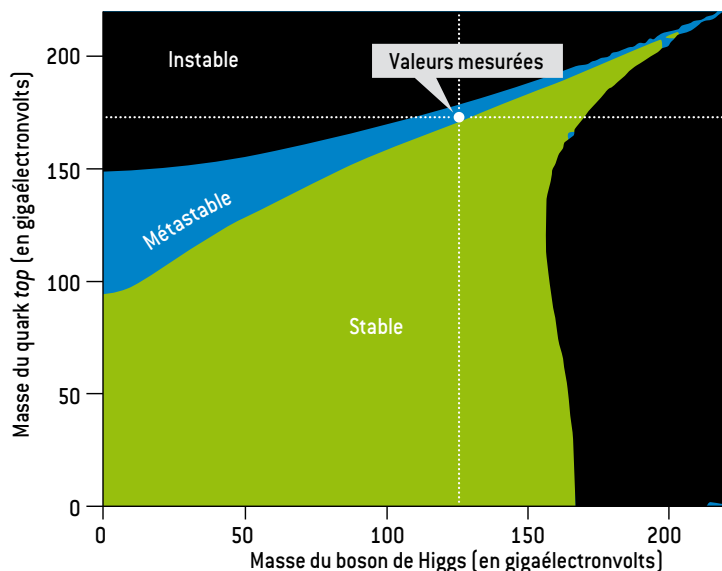
Pour de nombreux physiciens, l'hypothèse du multivers est troublante et se rapproche trop de l'idée que les anomalies de la physique des particules sont dues à des «armées d'anges invisibles». Comme le dit le physicien américain et prix Nobel David Gross, faire appel au multivers, à des conditions initiales impossibles à connaître, c'est un peu «s'avouer vaincu et jeter l'éponge».

Une autre possibilité pour obtenir les valeurs des paramètres du modèle standard est explorée par Lisa Randall, de l'Université Harvard, et Raman Sundrum, de l'Université du Maryland. Ces deux physiciens ont montré qu'une dimension supplémentaire présentant une géométrie «tordue» peut expliquer la faiblesse de la gravitation comparée aux autres forces connues. Si de telles dimensions supplémentaires sont microscopiques, nous pourrions ne pas les avoir encore remarquées, mais leur taille et leur forme pourraient jouer un rôle important en physique des particules de haute énergie.

Dans ces modèles, plutôt que de trouver des superpartenaires au LHC, nous pourrions découvrir des modes de Kaluza-Klein, des particules exotiques lourdes dont la masse correspond en fait à l'énergie de leur mouvement dans les dimensions supplémentaires (voir l'encadré pages 44 et 45).

AU BORD DE LA CATASTROPHE

Le champ de Higgs, associé au boson du même nom, est un champ qui imprègne tout l'espace. Il confère aux particules leur masse et semble stable. Mais les masses mesurées du boson de Higgs et du quark *top* (une autre particule élémentaire) indiquent que le champ de Higgs se trouve dans un état métastable (stable pendant un temps limité). Des effets quantiques pourraient le faire passer dans un état plus stable, d'énergie inférieure. La masse de toutes les particules changerait alors subitement, ce qui transformerait brutalement l'Univers. La supersymétrie contribuerait cependant à stabiliser le champ de Higgs.



Enfin, il est possible que vouloir à tout prix supprimer les effets des particules virtuelles, comme en supersymétrie, n'est pas la bonne idée. Une nouvelle approche consiste à intégrer ces effets pour expliquer d'où vient la masse. L'idée est similaire à ce qui se passe quand les physiciens calculent la masse du proton. Cette particule n'est pas élémentaire. Il s'agit d'un assemblage de trois quarks, qui ont une masse minuscule, et de gluons, dont la masse est nulle. Or le proton est beaucoup plus lourd que la somme des quarks et des gluons dont il est composé. D'où vient cette masse ? Elle vient de l'énergie des champs associés à l'interaction forte qui assure la cohésion du proton. Notre compréhension de ces champs nous permet de prédire précisément la masse du proton.

D'ordinaire, nous pouvons calculer des masses à partir d'autres masses. Cependant, le modèle standard ne permet pas de prévoir la masse du boson de Higgs – nous devons la mesurer. Il semble étonnant que l'on puisse calculer la masse du proton, mais pas celle du boson de Higgs. À partir des travaux de William Bardeen, physicien au Fermilab, quelques théoriciens suggèrent que la masse du boson de Higgs est déterminée par un processus analogue à celui utilisé pour le proton, et qui est nommé transmutation dimensionnelle.

Une telle approche permet de conserver les effets utiles des particules virtuelles tout en évitant ceux qui sont désastreux. En revanche, elle nécessite d'abandonner certaines autres idées véhiculées par la supersymétrie, telle l'unification des lois de la physique à très haute énergie. Et le lien entre la physique quantique et la relativité générale, qui se dérobe à nous depuis si longtemps, en devient plus mystérieux encore. Toutefois, ce modèle a d'autres avantages, notamment celui de proposer un candidat à la matière noire. Sa masse découlerait de ses interactions avec la matière ordinaire, interactions qui seraient véhiculées par le boson de Higgs. Cette prédiction spectaculaire sera testée au LHC ainsi que dans des expériences souterraines de détection de matière noire.

La supersymétrie n'a pas dit son dernier mot. Plusieurs indices suggèrent qu'elle pourrait tout de même s'intégrer aux lois de la physique. Parmi les observations les plus récentes, on peut évoquer le rôle de la masse du boson de Higgs et son impact sur la stabilité de l'Univers.

La supersymétrie dans l'hélium 3

Récemment, Tarun Grover, de l'Université de Californie à Santa Barbara, et ses collègues ont montré que certains phénomènes dans le domaine de la matière condensée peuvent être théoriquement décrits par la supersymétrie. Ils ont analysé ce qui se passe dans de l'hélium 3 superfluide, à une température proche du zéro absolu. Les atomes (des fermions, leur spin ou moment cinétique intrinsèque étant demi-entier) s'associent par paires pour former des bosons (de spin entier), sauf sur les bords de l'enceinte. En présence d'un champ magnétique, les fermions des bords disparaissent. Lors de cette transition, le comportement des fermions et des bosons est analogue à celui de superpartenaires.

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Ellis, Le boson de Higgs, et après ?, *Pour la Science*, n° 419, septembre 2012.

G. Ellis, Le multivers existe-t-il ?, *Pour la Science*, n° 412, février 2012.

G. Kane, Supersymétrie : les lois ultimes de la nature dévoilées, Le Pommier, 2003.

N. Arkani-Hamed et al., Les dimensions cachées de l'Univers, *Pour la Science*, n° 276, octobre 2000.

La découverte du boson de Higgs implique qu'il existe un champ associé à cette particule qui est présent partout dans l'Univers. L'interaction des particules avec ce champ leur confère leur masse. Cela signifie que le vide est en réalité un endroit où il se passe beaucoup de choses, où la combinaison du champ de Higgs et des particules virtuelles produit une dynamique complexe. Mais cette dynamique est-elle stable ? Si elle ne l'est que temporairement, on parle d'équilibre métastable ; le champ de Higgs pourrait alors subir une « transition de phase » et basculer dans une configuration plus stable. L'énergie associée au champ changerait de valeur ainsi que la masse de toutes les particules et la physique de l'Univers, qui d'une certaine façon repartirait de zéro. La supersymétrie permet de stabiliser le vide et d'empêcher de tels accidents.

Un futur incertain

En l'absence de supersymétrie, la stabilité du vide dépend beaucoup de la masse du boson de Higgs. Or la masse que l'on a mesurée correspond à une frontière, impliquant un vide durable, mais au bout du compte instable (voir l'encadré page ci-contre). Un boson de Higgs plus lourd impliquerait un univers stable, alors qu'un boson de Higgs plus léger conduirait à terme à la catastrophe. La nature essaie de nous dire quelque chose, mais nous ignorons quoi.

Les physiciens attendent donc l'issue de la prochaine campagne du LHC. Si des superpartenaires sont observés, les appréhensions actuelles des physiciens des particules céderont la place à une excitation incroyable d'avoir enfin ouvert une brèche vers le monde supersymétrique. Et ce sera le début d'une grande aventure intellectuelle.

Mais si l'on ne trouve pas ces superpartenaires, la physique des particules sera confrontée à une crise. Cette perspective inspire déjà une réflexion radicalement nouvelle sur les phénomènes qui sous-tendent la trame de l'Univers. Une meilleure compréhension des propriétés du boson de Higgs sera cruciale pour construire cette nouvelle voie. Et les signaux astrophysiques et cosmologiques de la matière noire pourraient nous baliser le chemin à suivre. ■



du

Markus Hilgert

En Mésopotamie, l'écriture cunéiforme a été pratiquée pendant des millénaires. L'analyse des textes permet de reconstituer comment les scribes l'apprenaient. Elle indique aussi comment se prononçaient les langues transcrites en cunéiforme.

L'apprentissage cunéiforme

C'est à partir de 3300 avant notre ère environ que l'on a commencé à écrire sur l'argile en Mésopotamie. Cela durera quelque 3500 ans... Grâce à ce système d'écriture, des scribes rédigeaient missives et contrats, notaient les lois et les protocoles à suivre pendant les rituels, consignaient les observations astronomiques, le savoir médical, transmettaient des mythes et des œuvres littéraires...

À l'aide d'un stylet taillé dans le roseau, le calame, ils imprimaient sur des tablettes façonnées dans l'argile fraîche des signes en forme de coins, de clous verticaux ou horizontaux, ou de têtes-de-clou. Une fois inscrites, les tablettes d'argile étaient simplement mises à sécher au soleil. Cette façon de transmettre de l'information a beau sembler fragile, elle s'est révélée la plus durable de toutes celles que l'humanité a jamais employées!

1. CETTE LISTE DE NOMS de fonctions date de 3300 avant notre ère; découverte à Uruk, elle débute par les titres de hauts fonctionnaires de la ville, puis ceux en charge de la justice, de l'élevage et des terres agricoles.

L'ESSENTIEL

- À la fin du IV^e millénaire avant notre ère, apparaît dans les villes de basse Mésopotamie un système d'écriture à base de signes en forme de clous imprimés dans l'argile.
- Le support argileux est si durable que les textes cunéiformes sont devenus la principale source d'information sur le Proche-Orient ancien.
- La formation à l'écriture cunéiforme commençait par l'apprentissage du sumérien.
- L'analyse linguistique reconstitue en partie la prononciation du sumérien et de l'akkadien.

Sauf mention contraire, les photos appartiennent à Orla M. Tassner / Musées de la ville de Berlin

La maîtrise de l'écriture cunéiforme et de toutes ses applications exigeait une longue formation. Comme nous allons le voir, l'étude des textes scolaires servant à l'apprentissage des scribes dévoile comment se déroulait leur formation; et l'analyse minutieuse de ces cas d'école nous indique même comment se prononçaient des langues disparues.

En effet, si l'écriture cunéiforme a été inventée en basse Mésopotamie, elle a servi à transcrire les langues de tout le Proche-Orient ancien. Parmi elles, il faut citer au moins le sumérien, une langue d'origine inconnue, l'akkadien, une langue sémitique comme l'hébreu et l'arabe, et le hittite, qui appartient à la branche anatolienne des langues indo-européennes.

Pendant la seconde moitié du II^e millénaire avant notre ère, l'écriture cunéiforme était le support privilégié des échanges diplomatiques dans tout le Proche-Orient, comme l'illustrent les archives en cunéiforme découvertes à Amarna, la capitale du pharaon Akhénaton (de 1355 à 1337 avant notre ère). Ces tablettes constituent la plus importante source dont nous disposons